ارزیابی استحکام و سختی کامپوزیت آلومینیم گرافیت تولید شده به دو روش SPS و CPS با اختلاط به روش همگن سازی در مایع*

حسین پاکدل نوقابی[۱]   سید عبدالکریم سجادی[۲]   ابوالفضل باباخانی[۳]

چکیده

در این پژوهش، اختلاط پودرهای آلومینیم خالص و گرافیت برای تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیم، تقویت‌شـــده با ذرات پودر گرافیت، از روشی جدید به نام همگن‌سازی در مایع استفاده شد. میزان گرافیت در این پژوهش از صفر تا ٤/٥ درصد وزنی درنظر گرفته شد. از پودرهای حاصل از روش همگن‌سازی در مایع با دو روش تف‌جوشی پلاسمایی جرقه‌ای و پرس سرد - تف‌جوشی در کوره خلأ تحت فشار و دما و زمان‌های مختلف نمونه‌های کامپوزیتی تولید شد. به منظور بررسی ریزساختار، نمونه های حاصل به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی بررسی و تحلیل شدند. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی، نمونه‌ها تحت آزمون‌های فشار و سختی سنجی (برینل) قرار گرفتند. بررسی نتایج و مشاهدات، توزیع ذرات گرافیت در زمینه ی آلومینیم با روش همگن سازی در مایع بهبود چشمگیری را نشان داد که همین امر باعث بهبود خواص مکانیکی شده است. همچنین افزودن گرافیت تا سه درصد وزنی بطور بسیار یکنواخت در زمینه و بدون کلوخه شدن رخ داد. در این روش اختلاط، با افزودن گرافیت تا درصد بهینه، سختی و استحکام فشاری افزایش یافت. با توجه به نتایج آزمون فشار، میزان استحکام فشاری به دست آمده از این روش اختلاط، نسبت به سایر روش‌های تولید این کامپوزیت حداقل ٤٣/٢ درصد افزایش داشت. حتی این استحکام با تغییر برخی پارامترهای تف‌جوشی مانند، فشار در روش تف‌جوشی پلاسمایی جرقه‌ای، به ١٠٤/٨ درصد افزایش نسبت به سایر روش‌های همگن‌سازی این کامپوزیت هم رسید. همچنین، نمونه با درصد بهینه (سه درصد گرافیت)، دارای افزایش استحکام فشاری تا ١٣٨/٧ درصد و افزایش سختی تا ٦٩/٦ درصد نسبت به آلومینیم خالص بود.

واژه‌های کلیدی کامپوزیت آلومینیوم/گرافیت، همگن‌سازی در مایع، *تف‌جوشی پلاسمایی جرقه‌ای*، پرس سرد، استحکام فشاری، سختی.

Assessment of Compressive Strength and Hardness of Al-Gr Composites Produced Using Liquid Homogenization Followed by Cold-Press and SPS

H. Pakdell Noghabi   S. A. Sajjadi   A. Babakhani

Abstract

A relatively new method, homogenization in liquid phase, was used to produce aluminum-matrix composite reinforced by graphite particles. The graphite content was chosen from zero to 4.5wt.% in this study. Composite samples were produced using the mixed powder by two ways: spark plasma sintering and cold-press sintering under different pressure, temperature and time conditions. The specimens' microstructure was investigated by optical microscopy and scanning electron microscopy. To evaluate the mechanical properties of the samples, compression tests and hardness measurements were performed. According to the results, homogenization in liquid phase method caused significant improvements in the distribution of graphite particles in the matrix. Improved mechanical properties were obtained at 3wt.% graphite. According to the results, the compressive strength of Al-2.5wt.% Gr composite, obtained from this mixing process and cold-press sintering, was increased at least 113.8% compared to the pure aluminum. Moreover, SPS process increased the strength of Al-3wt.% Gr composite to about 206.2%, compared to pure aluminum.

Key Words Aluminum-Matrix composite; Graphite; Liquid phase homogenization; SPS; Compressive Strength; hardness.

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ٩٤/١/٧ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ٩٦/٧/٣ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: sajjadi@um.ac.ir

(۳) استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد.

DOI: 10.22067/ma.v0i29.45466

مقدمه

کامپوزیت‌های آلومینیوم/گرافیت با قابلیت خود روانکاری و خواص سایشی مطلوب به دلیل تشکیل فیلم روانکار بر سطح [6–1]، سبک بودن [1 و 7]، قابلیت ماشین‌کاری بهتر نسبت به زمینه [8]، ضریب انبساط حرارتی کم، و قابلیت جذب ارتعاش [11–9]، پتانسیل بالایی را برای ساخت آستر سیلندر، پیستون، یاتاقان‌ها و کاربردهای عمومی مهندسی دارا می‌باشند [12 و13].

از جمله روش‌های اقتصادی جهت ساخت کامپوزیت‌های آلومینیوم / گرافیت روش متالورژی پودر می‌باشد [1 و 14]. مراحل اصلی تولید در این روش شامل مخلوط‌سازی، متراکم‌سازی و تف‌جوشی مخلوط پودری آلومینیم و گرافیت است [1]. حضور گرافیت در زمینه‌ای از آلیاژ آلومینیم، گاهی اوقات باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود [15 و 16] ولی گاهی اوقات باعث کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت نسبت به آلیاژ می‌شود [12 و17-19]. نتایج برخی تحقیقات نشان داد که سختی و استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیت‌های آلومینیوم/ گرافیت، تا یک مقدار بهینه‌ای، افزایش یافته است [15 و16]. ولی تحقیقاتی نیز انجام گرفته‌اند که در آنها کاهش سختی کامپوزیت‌های آلومینیوم/گرافیت را با افزایش درصد گرافیت نشان می‌دهند [12 و17]. خواص کششی کامپوزیت‌های آلومینیوم/گرافیت تحت تاثیر مقدار گرافیت می‌باشد به‌طوری که معمولاً با افزایش درصد گرافیت خواص کششی کامپوزیت کاهش می‌یابد [18]. همچنین گزارش شده است چقرمگی شکست کامپوزیت‌های آلومینیوم/گرافیت با افزایش مقدار گرافیت کاهش می‌یابد [19]. مطالعات انجام گرفته روی کامپوزیت‌های آلومینیوم/گرافیت نشان داده که انجام عملیات حرارتی با توجه به آلیاژ زمینه باعث بهبود خواص سایشی و مکانیکی این دسته از کامپوزیت‌ها می‌گردد [20 و21].

مشخص است که اولین نیاز یک کامپوزیت برای نشان دادن کارایی بالای آن، توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده است. آگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده باعث افت خواص مکانیکی می‌شود. پس تا زمانی که ذرات تقویت‌کننده در زمینه بطور یکنواخت توزیع شود و کلوخه شدن رخ ندهد، خواص مکانیکی افت نمی‌کند. یکی از روش‌های تف‌جوشی در متالورژی پودر روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای -spark plasma sintering) (SPSاست. در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، مخلوط پودر آلومینیم- گرافیت درون قالب استوانه‌ای شکل ریخته می‌شود و با اعمال همزمان فشار و جریان الکتریکی و ایجاد جرقه بین ذرات، تف‌جوشی پودرها انجام می‌شود. این روش در مقایسه با روش فشردن گرم در مدت کوتاه‌تر و دمای پایین‌تر انجام می‌شود و بازدهی این روش بسیار بالاست، زیرا انواع مکانیزم‌های گرمایش مختلف (پلاسمایی و ژولی) با تغییرشکل پلاستیک به طور همزمان انجام می‌شود و بنابراین، پیوند بین ذرات تف‌جوشی شده آن قوی‌تر خواهد شد. همچنین از آنجایی که فقط لایه‌های سطحی ذرات پودر در این روش گرم می‌شوند، (دمای میانگین توده‌ی پودر نسبتا پایین می‌باشد)، باعث خالص‌سازی و فعال‌سازی بهتر سطح ذرات پودر (تبخیر آلودگی‌های از پیش موجود در سطح ذرات پودر) نیز می‌شود. همچنین نرخ گرمایش در این روش بالاست و زمان فرآیند بسیار کم است [۲۲].

در تحقیق حاضر، از یک روش جدید با نام روش همگن‌سازی در مایع که برای اولین بار توسط این گروه تحقیقاتی در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد ابداع شده، برای اختلاط و تولید مخلوط پودری آلومینیوم/گرافیت استفاده شده است. روش همگن‌سازی در مایع، که آماده‌سازی پودر توسط همگن و یکنواخت کردن اجزا کامپوزیت در یک محلول ابی و به کمک دستگاه آلتراسونیک انجام می‌شود، برای تولید کامپوزیت به روش متالورژی پودر استفاده شده است. با استفاده از روش همگن‌سازی در مایع امکان توزیع یکنواخت ذرات ریز وجود دارد. بنابراین، این روش یک فرآیند کارآمد برای ارتقاء تولید مواد توسط متالورژی پودر است. مقدار

استحکام‌بخشی توسط ذرات ریز، وابسته به نوع ذرات، اندازه، مورفولوژی، کسر حجمی و توزیع آنها می‌باشد. موضوع این تحقیق، بررسی استحکام فشاری و سختی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم که توسط ذرات گرافیت تقویت شده است می‌باشد. پودرهای اولیه مورد نیاز به روش همگن‌سازی در مایع تهیه شده است و تولید آن به دو روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای و پرس سرد-تف‌جوشی CPS (cold press sintering) در کوره خلأ انجام شده است. همچنین به بررسی تاثیر در صد وزنی گرافیت روی استحکام فشاری پرداخته شده است. اگرچه در این تحقیق تنها تاثیر مقدار ذرات افزودنی و فشار و دما و زمان بررسی شده است ولی عوامل و پارامترهای دیگری نیز می‌توانند روی خواص مکانیکی کامپوزیت موثر باشند از جمله: زمان آلترا سونیک کردن مخلوط پودر، فرکانس آلتراسونیک کردن، شرایط اتمسفری خشک نمودن پودر، شرایط فشرده‌سازی پودر، شرایط تف‌جوشی از قبیل: جریان و شرایط اتمسفری و زمان، اندازه ذرات تقویت‌کننده و پودرآلومینیم، و خلوص پودر آلومینیم و پودر گرافیت مورد استفاده.

مواد و روش تحقیق

مواد در این آزمایش از پودر آلومینیم با خلوص بالا (٪ ۹۹/۹) با اندازه ی دانه ٤۵ میکرومتر به عنوان زمینه کامپوزیت و پودر گرافیت با استاندارد UF4 (با اندازه ۱۰ میکرومتر) به عنوان ماده ی تقویت کننده استفاده شد. پودر آلومینیم محصول هند بود و پودر گرافیت نیز از کارخانه متالورژی پودر مشهد تهیه گردید. از استون نیز به‌عنوان ماده همگن کننده در فاز مایع در طی مراحل آماده سازی استفاده شد.

روش انجام آزمایش. ابتدا مقدار مورد نیاز گرافیت و آلومینیم برای تولید کامپوزیت با مقادیر گرافیت صفر و ۱/۵، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ٤/۵ درصد وزنی توزین و بعد گرافیت‌های مربوط به هر نوع کامپوزیت در بشرهای جداگانه در استون ریخته شد و به مدت ۱ ساعت در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. سپس پودر آلومینیم به محلول حاصل از مرحله ی قبل به آهستگی اضافه شد و دوباره به مدت ٤ درساعت در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. آنگاه مخلوط حاصل فیلتر شد و در دمای۹۰ درجه سانتیگراد و اتمسفر خلأ در دستگاه آون به مدت ٦ ساعت خشک گردید. سپس عملیات پرس و تف‌جوشی پودر مخلوط خشک شده حاصل به روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای و به روش پرس سرد-تف‌جوشی در کوره خلأ انجام شد. در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای ابتدا پودر خشک شده حاصل در یک قالب استوانه ای گرافیتی با قطر خارجی ۲۰ میلیمتر، قطر داخلی ٦ میلیمتر و ارتفاع ۲۵ میلیمتر با فشار مناسب (١٤، ۲۸، ۳۸/۵ و ٤۵/۵ مگاپاسکال) فشرده شدند، و سپس تف‌جوشی در دمای۵۹۰ درجه سانتیگراد و شرایط اتمسفری خلأ Torr ۱۰-۲ و به مدت زمان مناسب (۳۹۰ ثانیه و ٦۰۰ ثانیه) و با جریان الکتریکی مستقیم پالسی با چگالی ۷ آمپر بر میلیمتر مربع انجام شد. آنگاه در شرایط خلأ نمونه‌ها سرد شدند. یکی از مهمترین ویژگی‌های تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای سرعت گرمایش بسیار بالای این روش نسبت به روش‌های معمولی تف‌جوشی است. بررسی تغییرات دما در حین تف‌جوشی با قرار دادن ترموکوپل در جداره قالب گرافیتی اندازه گیری شد. پس از تف‌جوشی پودرهای مورد نظر، جریان الکتریکی قطع و نمونه به‌صورت طبیعی در محیط خلأ سرد شد. درنهایت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ٦ و طول۱۰ میلیمتر تولید شدند.

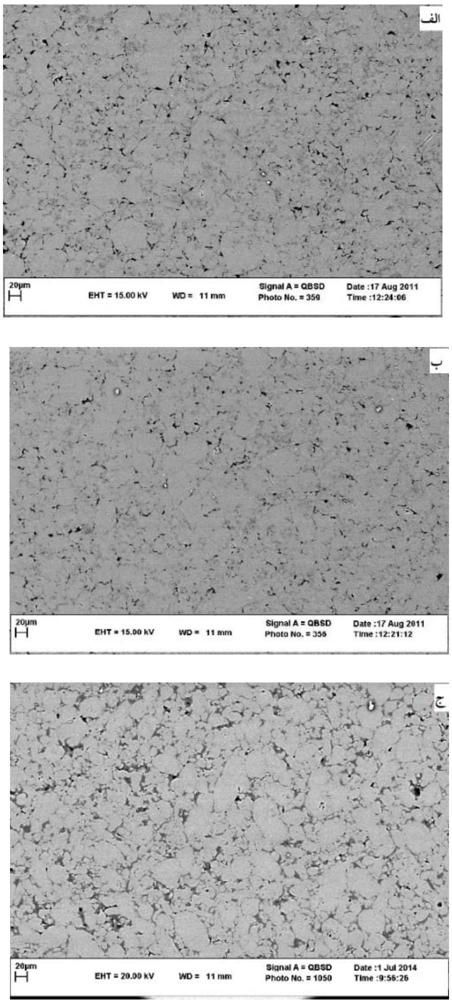
برای روش پرس سرد-تف‌جوشی در کوره خلأ، ابتدا مخلوط پودر خشک شده حاصل از فرایند همگن‌سازی در فاز مایع در فشار ۵۰۰ مگاپاسکال به‌صورت سرد فشرده شدند. در ادامه، کامپوزیت در دمای۵۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر خلأ به مدت ٦ ساعت تف‌جوشی گردیدند و در همان محیط (خلأ) سرد شدند.

نمونه‌های حاصل ابتدا تحت بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی قرار

گرفتند. سپس آزمون فشار بـه‌وسـیله دسـتگاه آزمایش فـشار و کـشش مـدل Zwick/2250 (طبق استاندارد ASTM E9 با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ انجام شد. نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۳ و آزمـون تـا افت ناگهانی تـنش کـه مرحلـه شکست در نظـر گرفته شـده، ادامه یافت. برای کاهش اصطکاک در سـطوح بـین فـک دسـتگاه و نمونه از روان‌ساز گریس استفاده گردید. همچنین سطح مقطع عرضی نمونه‌های تحت آزمایش فشار، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس سختی نمونه‌ها به وسیله سختی‌سنجی برینل (HB) با نیروی ۵ کیلوگرم نیرو از میانگین ۵ اندازه‌گیری بـرای هـر نمونـه تعیین گردید.

نتایج و بحث

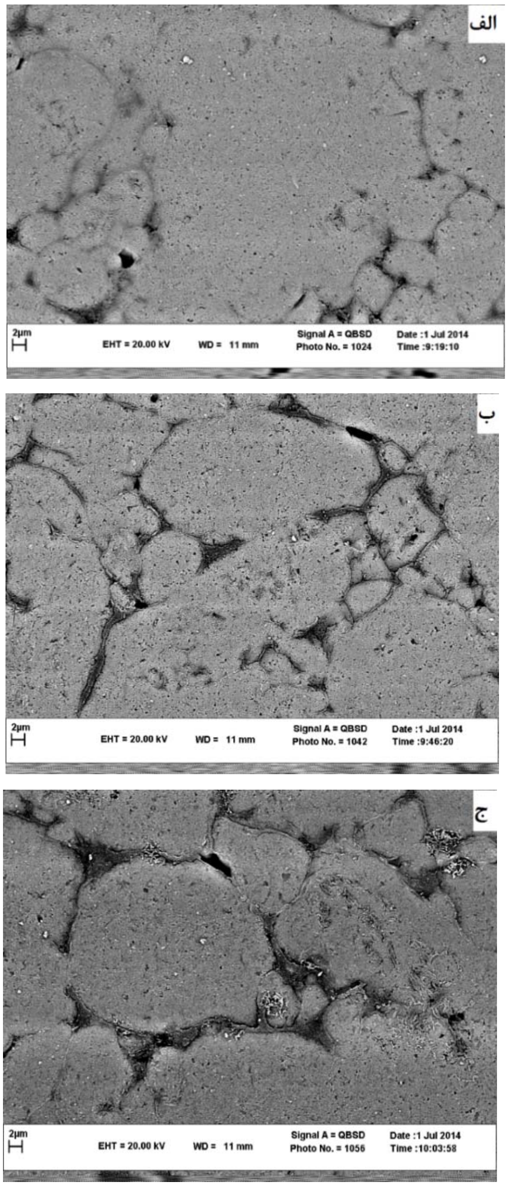
ریزساختار طبق تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (شکل‌های (۱) و (۲))، گرافیت در زمینه به دو صورت مشاهده می‌شود. نوع اول گرافیت‌ها به صورت توده‌ای بسیار ریز (ترجیحا کروی) در بخش‌هایی از زمینه به‌صورت همگن با توزیع یکسان قرار دارند. نوع دوم گرافیت‌ها به‌صورت لایه‌های نازک کشیده شده بسیار کوتاه در زمینه دیده می‌شوند. در حالی که گزارش شده است وقتی اختلاط با استفاده از روش آسیاکاری انجام شده و پرس گرم در فشار۴۵۰ مگاپاسکال و تف‌جوشی در کوره در دمای۶۵۰ درجه سانتیگراد صورت گرفته است، گرافیت‌ها به صورت لایه‌های کشیده و کلوخه‌های بزرگ در زمینه دیده می‌شوند [۲۲]. گرافیت توده‌ای هرچه بزرگ‌تر و توزیع آن ناهمگن‌تر باشد، باعث بوجود آمدن محل‌های تمرکزتنش درساختار می‌شود و همین امر موجب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد. گزارش شده است در نمونه‌هایی که آماده‌سازی پودر و اختلاط آن توسط آسیاکاری و تف‌جوشی توسط تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای انجام شده، نیز توزیع گرافیت به صورت کاملا همگن و یکنواخت نبوده و توده‌های گرافیت بزرگی وجود داشته‌اند که حتی با سنباده‌زنی، لایه‌هایی از این توده‌ها کنده و حفراتی را ایجاد کرداند [23]. این توده‌های گرافیتی، با افزایش درصد گرافیت کامپوزیت بیشتر می‌شوند.



شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت های الف) Al – 1.5 % Gr ب) Al – 3 % Gr ج– Al – 4.5 % Gr تولید شده به روش همگن‌سازی در مایع و سپس پرس سرد- تف‌جوشی شده

طبق مشاهدات می‌توان بیان نمود که با استفاده از روش همگن‌سازی در مایع با افزایش درصد گرافیت، تا یک اندازه‌ی بهینه‌ای (تا سه درصدگرافیت) کلوخه شدن اتفاق نمی‌افتد و یکنواختی توزیع خود را حفظ می‌کند. ولی بعد از این درصد بهینه با افزودن گرافیت کمی از یکنواختی کاهش می‌یابد اما در عین حال باز هم یکنواختی و همگن بودن آن نسبت به نمونه‌های مشابه

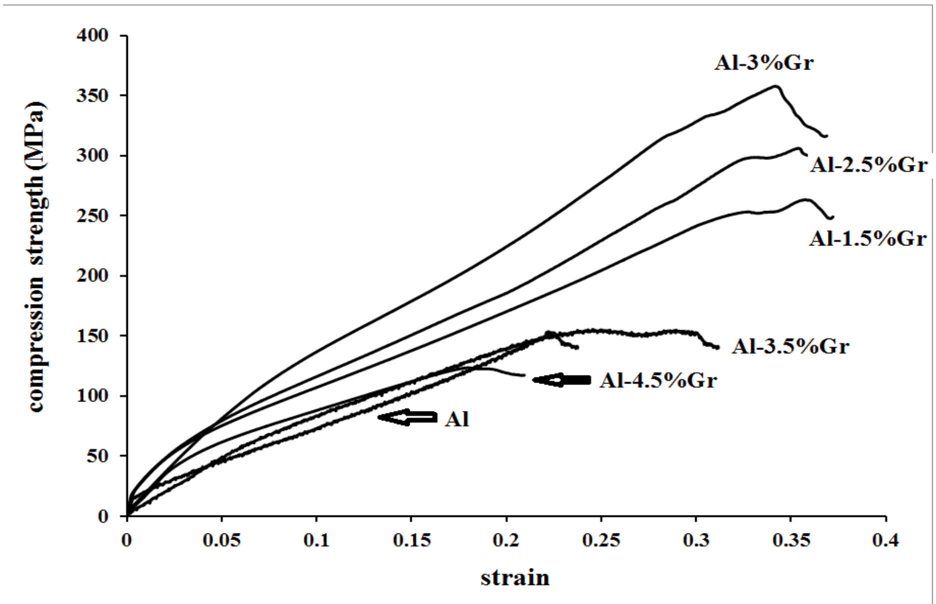
تولید شده با روش‌های دیگری مانند آسیاکاری بیشتر است. همچنین مقدار این درصد بهینه گرافیت (آلومینیم با سه درصد گرافیت) بسیار بیشتر از درصد بهینه گرافیت برای کامپوزیت‌های مشابه تولید شده به روش‌های جدید دیگر، که تلاش شده است به توزیع همگن دست یابد، است. گفتنی است براساس مطالعات انجام شده حداکثر درصد بهینه گزارش شده در سایر روش‌های همگن‌سازی ۱ درصد وزنی بوده است. این توزیع یکنواخت‌تر و نیز کوچک‌تر بودن توده‌های گرافیتی روی بهبود خواص مکانیکی و خوردگی تأثیر زیادی دارد که نتیجه این امر از نتایج آزمون‌های مکانیکی به وضوح مشاهده می‌شود. بعد از درصد بهینه گرافیت، هر چه میزان و اندازه‌ی گرافیت‌های توده‌ای افزایش داشته باشد، هر چند که توزیع آنها در زمینه یکنواخت باشد، می‌تواند باعث کاهش در خواص مکانیکی شود. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که اختلاط ذرات گرافیت در آلومینیم با دو روش متفاوت موجب توزیع متفاوتی از گرافیت‌های لایه‌ای می‌شود [۲۲]. در آن گزارش آمده است که گرافیت‌های لایه‌ای در روش اختلاط با استفاده از روش آسیاکاری و پرس گرم در فشار۴۵۰ مگاپاسکال و تف‌جوشی در کوره در دمای۶۵۰ درجه سانتیگراد طول بیشتری نسبت به زمانی که با روش همگن‌سازی در مایع مخلوط شده‌اند دارند به طوری که تقریبا خطوط گرافیت به صورت موازی و ممتد می‌باشند. در تحقیق حاضر نیز مشخص شد که روش همگن‌سازی در مایع باعث می‌شود که خطوط گرافیت لایه‌ای منقطع و بسیار کوتاه‌تر و نازک‌تر شوند که همین امر موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌گردد. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد گرافیت، ضخامت لایه‌های گرافیتی تجمع یافته افزایش می‌یابند. ضمنا به این نکته توجه شود که در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای به علت ایجاد پلاسما و دمای بالاتر سطح ذرات، سیلان ذرات و جابجایی آنها به‌صورت موضعی به وجود می‌آید که موجب تراکم بیشتر آنها نسبت به روش پرس سرد-تف‌جوشی می‌شود. این موضوع را با مقایسه نمونه‌های آسیاکاری و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای شده و همچنین نمونه‌های همگن شده در مایع و سپس پرس سرد-تف‌جوشی شده با نمونه‌هایی که به روش همگن شده در فازمایع و سپس تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای می‌توان متوجه شد. نتایج نشان داد که همگن‌سازی یکنواخت‌تری از توزیع گرافیت در نمونه‌های ساخته شده با روش همگن‌سازی در مایع و سپس تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای شده به وجود آمده است.



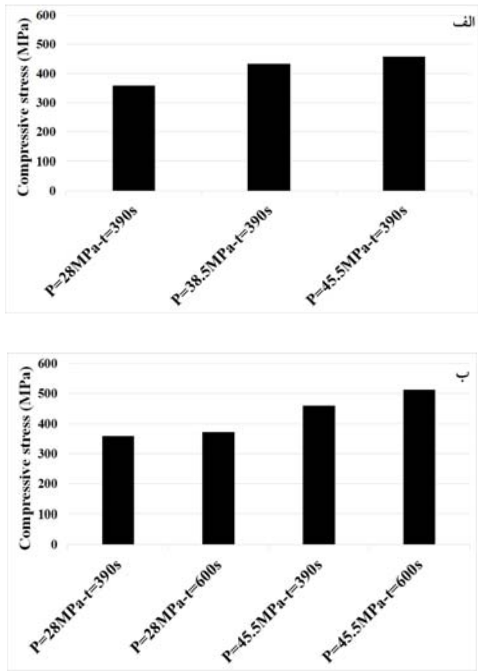
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت‌های الف- Al – 1.5 % Gr ب- Al – 3 % Gr ج- Al – 4.5 % Gr تولید شده به روش همگن شده در مایع و سپس تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای شده

آزمون فشار نمودار آزمون فشار برای نمونه‌های با درصدهای مختلف گرافیت در فشار ۲۸ مگاپاسکال و مدت زمان تف‌جوشی ۳۹۰ ثانیه در شکل (۳) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام فشاری در کامپوزیت با ۱/۵ درصد وزنی گرافیت بسیار بیشتر از آلومینیم خالص است و با افزودن گرافیت تا ۳ درصد این استحکام رو به افزایش است. به عبارت دیگر بهینه‌ترین و بیشترین استحکام فشاری در کامپوزیت Al-3%Gr (در این شرایط دمایی و فشاری) می‌باشد. با افزودن گرافیت بیش از ۳ درصد وزنی، استحکام فشاری نمونه کمتر از استحکام فشاری نمونه ۱/۵ درصد می‌شود و هرچه درصد گرافیت بیشر شود، استحکام فشاری باز هم بیشتر کاهش می‌یابد. علت افزایش استحکام را ناشی از توزیع یکنواخت گرافیت در زمینه آلومینیم و عدم کلوخه شدن و کاهش تخلخل تا درصد بهینه، می‌توان بیان کرد. اما بیش از درصد بهینه کم‌کم تجمعات کروی کوچک ایجاد می‌شود. استحکام فشاری نمونه‌ی ۳ درصد با مقدار ۳۵۸ مگاپاسکال و استحکام فشاری نمونه‌ی ۴/۵ درصد با مقدار ۱۲۳/۵۹۸ مگاپاسکال به ترتیب بیشینه و کمینه می‌باشند.

در این تحقیق وقتی که بهینه‌ترین درصد گرافیت بدست آمد، تأثیر پارامترهای زمان و فشار تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای روی استحکام فشاری نمونه Al-3%Gr بررسی شد. برای این کار ابتدا پودرهای آلومینیم-گرافیت همگن شده در فاز مایع، یک بار در فشار ۳۸/۵ مگاپاسکال و زمان ۳۹۰ ثانیه و بار دیگر در فشار ۲۸ مگاپاسکال ولی در زمان بیشتر (۶۰۰ ثانیه) مورد تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای قرار گرفتند. همچنین نمونه‌ای در فشار ۴۵/۵ مگاپاسکال و همان زمان ۳۹۰ ثانیه و نمونه‌ای دیگر در فشار ۴۵/۵ مگاپاسکال ولی در زمان بیشتر (۶۰۰ ثانیه) تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای شدند. نتایج حاصله در شکل (۴) ارائه شده است. توضیح اینکه چون آزمون فشار در این کار تحقیقاتی تا مرحله افت ناگهانی تنش که مرحله شکست در نظر گرفته شده، انجام شده است در اینجا منظور از استحکام فشاری، بیشترین استحکامی است که نمونه تا قبل از شکست تحمل کرده است.



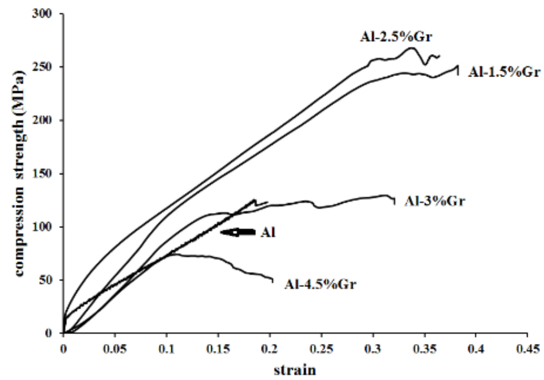
شکل ۳ نمودار آزمون فشار نمونه‌های کامپوزیتی و خالص تولید شده به روش همگن سازی در فازمایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در فشار ۲۸ مگاپاسکال و تف‌جوشی شده به مدت زمان ۳۹۰ ثانیه



شکل ٤ نمودار استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی Al-3%Gr تولید شده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در الف) فشارهای مختلف، و ب) فشارها و زمان‌های مختلف باهم

همانطور که مشاهده می‌شود در فشارهای تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای کمتر از ۳۸/۵ مگاپاسکال، افزایش فشار تأثیر بیشتری نسبت به افزایش زمان تف‌جوشی روی استحکام فشاری داشته است. البته افزایش زمان هم باعث افزایش استحکام فشاری شد، ولی به مقدار کمتر. اما بیشتر باعث افزایش تغییر شکل مومسان می‌شود که به علت تف‌جوشی بیشتر در همان دمای قبلی است. در فشارهای بالا (٤٥/٥ مگاپاسکال)، افزایش زمان کمی بیشتر تأثیرگذار است.

آزمایش فشار برای نمونه‌هایی با روش همگن‌سازی در فاز مایع ولی با فشار ۵۰۰ مگاپاسکال به صورت سرد و تف‌جوشی در کوره با دمای۵۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ٦ ساعت در اتمسفر خلأ نیز انجام شد که نتایج حاصله در شکل (۵) ارائه شده است. باتوجه به شکل مشاهده می‌شود مقاومت به فشار نمونه‌ی با ۲/۵ درصد گرافیت از سایر نمونه‌ها بیشتر و مقاومت به فشار نمونه‌ی با ٤/٥ درصد گرافیت از سایرین کمتر می‌باشد. استحکام فشاری نمونه‌ی ۲/۵ درصد با مقدار۲٦۸ مگاپاسکال و استحکام فشاری نمونه‌ی ٤/٥ درصد با مقدار ٧٤ مگاپاسکال به ترتیب بیشینه و کمینه می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود که استحکام فشاری با افزودن گرافیت به مقدار ۱/۵ درصد وزنی بیشتر از آلومینیم خالص است و با افزودن درصد گرافیت تا ۲/۵ درصد این استحکام رو به افزایش است. به عبارت دیگر بهینه‌ترین و بیشترین استحکام فشاری مربوط به کامپوزیت Al-2.5%Gr می‌باشد. با افزودن گرافیت به مقدار بیش از ۲/۵ درصد وزنی، استحکام فشاری کمتر از ۱/۵ درصد و حتی آلومینیم خالص می‌باشد و هرچه درصد گرافیت بیشتر شود، استحکام فشاری بیشتر کاهش می‌یابد. علت آن را در توزیع یکنواخت گرافیت در زمینه آلومینیم و عدم کلوخه شدن و کاهش تخلخل تا درصد بهینه، می‌توان بیان کرد. بطوریکه بیش از درصد بهینه، کم‌کم تجمعات کروی کوچک ایجاد شد.



شکل ۵ نمودار آزمایش فشار نمونه‌های کامپوزیتی و خالص تولید شده به روش همگن‌سازی در فازمایع و پرس سرد-تف‌جوشی شده

مزیت ارزشمندی که روش همگن‌سازی در فاز مایع، چه در نمونه‌های تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای شده و چه در نمونه‌های پرس سرد-تف‌جوشی شده نسبت به سایر روش‌های تولید کامپوزیت آلومینیم گرافیت دارد این است که درصد بهینه (به همراه عدم کلوخه شدن و داشتن توزیع یکنواخت) در روش همگن‌سازی در فاز مایع، ۳ و ۲/۵ درصد است در حالی که در سایر روش‌های تولید

کامپوزیت آلومینیم-گرافیت حداکثر یک درصد بوده است. ضمنا همانطور که بیان شد درصد بهینه در حالت تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای سه درصد و همان پودرها با همان روش آماده‌سازی و اختلاط ولی پرس سرد-تف‌جوشی شده ۲/۵ درصد است. این به خاطر جنبش و اختلاط بیشتر در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای است که موجب همگنی بیشتر و خواص مکانیکی مطلوب‌تر می‌شود. به همین دلیل مقدار استحکام فشاری در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای بسیار بیشتر از روش پرس سرد-تف‌جوشی و حتی سایر روش‌های دیگر تولید این کامپوزیت می‌باشد.

نکته‌ی دیگری که قابل توجه است این است که میزان استحکام فشاری در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای بسیار بیشتر از نمونه‌های مشابه تولید شده با روش پرس سرد-تف‌جوشی یا سایر روش‌های دیگر است و این به خاطر بازدهی بالای روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای و نرخ گرمایش یکسان در تمام نمونه و داشتن پیوندهای قوی بین ذرات تف‌جوشی شده همچنین داشتن انواع مکانیزم‌های گرمایشی (پلاسمایی و ژولی) و تغییرشکل پلاستیک همزمان با تف‌جوشی شدن است.

به‌طور کلی بدلیل توزیع یکنواخت گرافیت و کاهش میزان تخلخل در روش همگن‌سازی در مایع و ایجاد چسبندگی قوی بین ذرات پودر در روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، افزودن گرافیت به سیستم باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود.

حضور گرافیت در تغییر خواص فشاری نمونه‌های کامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف از گرافیت‌ها و همچنین برای مقایسه نمونه آلومینیم خالص نیز مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که مشاهده شد در نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۲/۵ و ۳ و ۳/۵ درصد وزنی گرافیت، استحکام فشاری نسبت به آلومینیم خالص افزایش یافته است. علت آن به خاطر توزیع یکنواخت گرافیت در زمینه آلومینیم است. ولی با افزایش درصد وزنی گرافیت در نمونه‌ها بیش از درصد بهینه، کاهش استحکام مشاهده می‌شود. در نمونه‌های کامپوزیتی با مقادیر بیشتر از ۳/۵ درصد وزنی گرافیت، استحکام کمتری نسبت به نمونه آلومینیمی خالص مشاهده می‌شود. همچنین در نمونه حاوی ۳/۵ درصد وزنی گرافیت کاهش استحکام نسبت به نمونه با ۳ درصد وزنی گرافیت مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان به عدم توزیع یکنواخت و تجمع گرافیت در اثر افزایش مقدار وزنی آنها در سیستم نسبت داد که در نتیجه باعث ایجاد نقاط تمرکز تنش در این نمونه‌ها شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه‌ی حاوی ۳/۵ درصد وزنی گرافیت، توزیعی تقریبا یکنواخت از گرافیت روی سطوح ذرات آلومینیم بوجود آمده است. با این حال توده‌های بسیار کوچک گرافیتی هنوز روی سطح ذرات آلومینیم نیز مشاهده می‌شود که احتمال داده می‌شود با کاهش درصد وزنی در نمونه‌ی حاوی ۳/۵ درصد گرافیت این نقاط کاهش پیدا کرده باشند چون استحکام این نمونه‌ها نسبت به نمونه ۳/۵ درصد گرافیت افزایش یافته است. در واقع در نمونه ۳/۵ درصد گرافیت، هم توزیع گرافیت‌ها دیده می‌شود و هم توده‌های ریز از گرافیت‌ها، که در حین اعمال تنش به این نمونه، توزیع گرافیت‌ها در زمینه آلومینیم باعث افزایش استحکام شده و توده‌های ریز گرافیت باعث تمرکز تنش و کاهش استحکام می‌گردد. نتایج بدست آمده از استحکام فشاری در مورد این نمونه نشان می‌دهد که در این رقابت حضور گرافیت‌ها بر اثر مضر تمرکز تنش توسط توده‌ها غلبه کرده و استحکام نسبت به نمونه آلومینیم خالص افزایش داشته است. ولی با افزایش درصد وزنی گرافیت در نمونه ٤/۵ درصد، توده‌های حاصل از تجمع گرافیت‌ها افزایش یافته است که در تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی تهیه شده از این نمونه‌ها نشان داده شده است.

این مناطق تجمع به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل نموده و شکست زود هنگام سیستم را سبب می‌شود. درصد کرنش نیز کاهش چشمگیری در این نمونه‌ها داشته است. این مسئله به خاطر شکست زودهنگام نمونه‌ها و

عدم شرکت گرافیت‌ها در تغییرشکل است. در تحقیقات مشابه نیز این مشکل مشاهده شده است. به‌طور مثال کوزوماکی [24]، با افزودن ۳ درصد وزنی گرافیت به سیستم، کاهش قابل توجه ۷۵ درصدی در تغییرات طول نسبت به نمونه خالص را مشاهده کرد که علت آن را عدم توزیع مناسب ذرات گرافیت در زمینه اعلام کرد.

واضح است که توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده نرم درون زمینه اثرات مهمی روی خواص مکانیکی کامپوزیت دارد. افزایش درصد تقویت‌کننده تا مقدار بحرانی معمولا باعث افزایش خواص مکانیکی، و بیش از آن باعث کاهش می‌شود و از طرفی هم افزایش درصد فاز تقویت‌کننده نرم با توزیع یکنواخت قابلیت فشردن پودر و پر شدن فضای خالی بین ذرات پودر را افزایش داده و باعث کاهش تخلخل می‌شود.

چقرمگی کامپوزیت‌های آلومینیم-گرافیت چقرمگی یک ماده میزان توانایی جذب انرژی تا مرحله شکست می‌باشد. یکی از راه‌هایی که می‌توان با آن چقرمگی را تعریف کرد این است که آن را برابر با سطح زیر منحنی تنش-کرنش فرض نمود. این مساحت نشان‌دهنده مقدار کار در واحد حجم است که می‌تواند روی ماده اعمال شود تا این که باعث شکست ماده گردد. بنابراین هرچه این مساحت بیشتر باشد، چقرمگی ماده نیز بیشتر است.

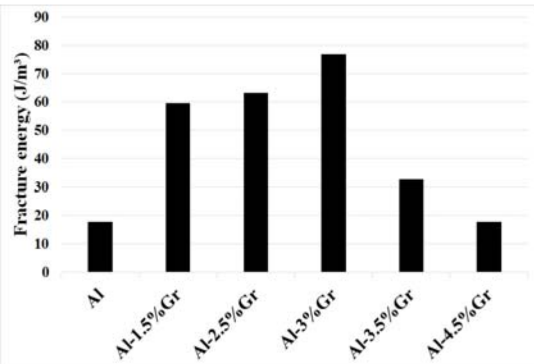
تأخیر در رشد ترک که منجر به افزایش کرنش در نمونه‌های کامپوزیتی می‌شود، اشاره به بهبود چقرمگی شکست دارد. مواد ترد معمولا استحکام بالایی داشته و در مقابل چقرمگی پایینی دارند.

شکل (٦) نشان می‌دهد که حضور گرافیت‌ها باعث بهبود انرژی جذب شده تا شکست در نمونه‌ی کامپوزیتی شده است.

مطالعات روی کامپوزیت آلومینیم-گرافیت نشان می‌دهد که آنها قادر به تغییرشکل الاستیک تحت تنش‌های بالا هم در کشش و هم در فشار می‌باشند که سبب جذب انرژی بالا توسط آنها در حین شکست می‌شود. توزیع مناسب و ایجاد اتصالات قوی گرافیت‌ها و زمینه منجر به جذب انرژی بالا توسط گرافیت‌ها می‌شود. علاوه بر این، گرافیت‌ها نقش مهمی را در ممانعت از رشد ترک بازی کرده و در نتیجه باعث بهبود چقرمگی شکست نمونه‌ی کامپوزیتی می‌گردد. به این ترتیب میزان افزایش انرژی جذب شده تا شکست به میزان توزیع گرافیت‌ها در زمینه برمی‌گردد. چنانچه مشاهده می‌شود در نمونه کامپوزیتی حاوی ۳/۵ درصد وزنی گرافیت، کاهش انرژی جذب شده تا شکست نسبت به نمونه حاوی ۳ درصد وزنی گرافیت به‌دلیل تجمع زیادتر گرافیت‌ها رخ داده است. بنابراین مشاهده می‌شود که چقرمگی پارامتری است که هم به استحکام و هم به انعطاف‌پذیری ماده بستگی دارد.

به‌منظور دست‌یابی به چقرمگی بهینه دو مطلب حائز اهمیت است:

اول اینکه تقویت‌کننده بتواند به صورت یک فاز ثانویه در زمینه توزیع شود و دوم اینکه زمینه بتواند یک چسبندگی بالایی داشته باشد که این مسئله روی پیوندها تأثیرگذار است.



شکل ٦ نمودار چقرمگی نمونه‌های کامپوزیتی و خالص تولید شده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در فشار ۲۸ مگاپاسکال و تف‌جوشی شده به مدت زمان ۳۹۰ ثانیه

نکته دیگری که در این تحقیق بدست آمد این است که چقرمگی در تمامی درصدهای گرافیت (۱/۵ تا ٤/۵) نسبت

به آلومینیم خالص بهبود یافته و بیشترین چقرمگی، در همان بهینه‌ترین درصد توزیع گرافیت یعنی ۳ درصد بود.

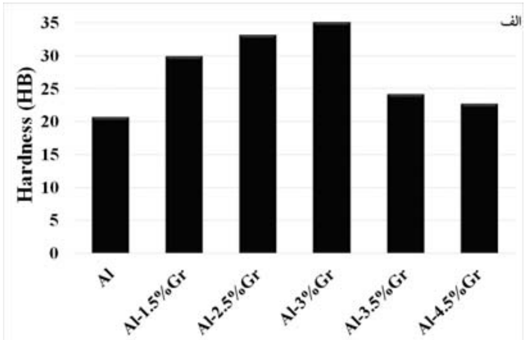
سختی‌سنجی. نتایج سختی‌سنجی نمونه‌های ساخته شده در فشار ۲۸ مگاپاسکال در شکل (۷) ارائه شده است.

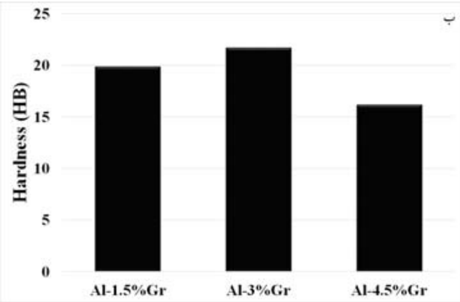
طبق داده‌های نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصدگرافیت، سختی کامپوزیت ابتدا تا یک درصد بهینه‌ای افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت آن این است که چون توزیع گرافیت در زمینه آلومینیم تا سه درصد در فشار تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای ۲۸ مگاپاسکال به طور یکنواخت و همگن و بدون کلوخه شدن انجام می‌شود، باعث بهبود خواص مکانیکی شده و سختی رو به افزایش است. با افزایش درصد گرافیت بیش از مقدار بهینه، تجمعات تقریبا کروی گرافیت و کلوخه شدن آن رو به رشد است و از آنجایی که گرافیت ماده‌ی نرم‌تری نسبت به آلومینیم است، طبیعی است که با افزایش درصد آن، سختی کامپوزیت کاهش یابد.

طبق داده‌های

شکل (۷) مشاهده می شود که سختی نمونه‌ها با کاهش فشار تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای نیز همین روند قبل را دارد اما مقدارش نسبت به نمونه‌های با فشار بیشتر، کمتر است که این بدیهی است زیرا در قطعات متالورژی پودر، با افزایش فشار پرس، سختی و استحکام و خواص مکانیکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

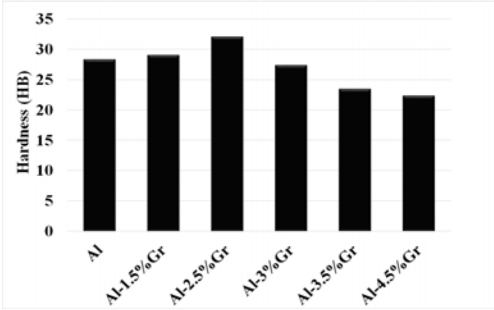
در روش همگن‌سازی در مایع و پرس سرد-تف‌جوشی شده، سختی نمونه‌ها اندازه‌گیری و نتایج حاصل در شکل (۸) نشان داده شده است.





شکل ۷ الف) نمودار سختی کامپوزیت آلومینیوم/گرافیت با درصدهای مختلف گرافیت تولید شده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در فشار ۲۸ مگاپاسکال و ب) نمودار سختی کامپوزیت آلومینیوم/گرافیت با درصدهای مختلف گرافیت تولید شده به روش همگن سازی در فاز مایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در فشار ۱٤ مگاپاسکال در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر فشار تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای روی سختی، مقدار سختی نمونه‌های کامپوزیتی در فشار کمتر (۱٤ مگاپاسکال) نیز بدست آمد که نتایج آن در (شکل ۷—ب) ارائه شده است.

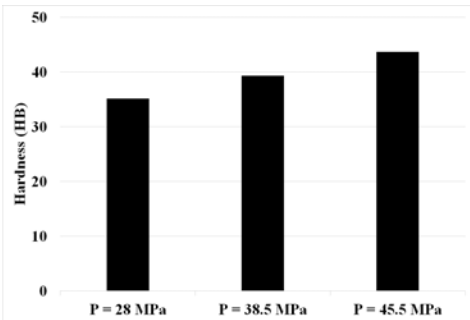
همانطور که طبق داده های شکل (۸) مشاهده می شود، در روش پرس سرد-تف‌جوشی نیز با افزایش درصدگرافیت، سختی کامپوزیت ابتدا تا یک درصد بهینه‌ای افزایش و سپس کاهش می یابد. علت آن این است که توزیع گرافیت در زمینه آلومینیم تا ۲/۵ در صد در این روش به طور یکنواخت و همگن و بدون کلوخه شدن انجام می شود که باعث افزایش سختی می گردد. با افزایش درصد گرافیت بیش از مقدار بهینه، تجمعات تقریبا کروی گرافیت و کلوخه شدن آن رو به رشد است و با توجه به اینکه گرافیت ماده‌ی نرم‌تری نسبت به آلومینیم است، طبیعی است که با افزایش درصد آن، سختی کامپوزیت کاهش یابد. ضمنا سختی کامپوزیت های Al-1.5%Gr و Al-2.5%Gr از آلومینیم خالص بیشتر است که ناشی از بهبود خواص مکانیکی آن می‌باشد.



شکل ۸ نمودار سختی کامپوزیت آلومینیوم/گرافیت با درصدهای مختلف گرافیت تولید شده به روش همگن سازی درمایع و پرس سرد-تف‌جوشی شده

همانگونه که مشاهده می‌شود افزودن گرافیت به ذرات پودر آلومینیم تا مقادیر تقریبا ۳ درصد وزنی و کمتر از آن باعث ایجاد یک ساختار شبکه‌ای در محل سختی‌سنجی شده و مقدار سختی را در این نمونه‌ها افزایش می‌دهد. ولی با افزایش درصد وزنی گرافیت باعث به هم چسبیدن و آگلومره شدن آنها شده که در نهایت افت سختی را در این نمونه‌ها بدنبال دارد.

شکل (۹)، نمودار سختی نمونه‌های کامپوزیتی Al-3%Gr تولید شده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد که نتایج آن روند مشابهی با حالت نمونه‌های پرس سرد-تف‌جوشی شده را دارد. یا به عبارتی با افزایش فشار تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، سختی افزایش می‌یابد.



شکل ۹ نمودار سختی نمونه‌های کامپوزیتی Al-3%Gr تولید شده به روش همگن سازی در فاز مایع و تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در فشارهای مختلف

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

۱- با استفاده از همگن‌سازی ذرات گرافیت در مایع و روش متالورژی پودر می‌توان یکنواختی بیشتری را در توزیع گرافیت ایجاد نمود، که این موجب افزایش و بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

۲- با افزایش درصد گرافیت (۰ ، ۱/۵ و ۲/۵) تا درصد بهینه (۳ درصد)، میزان سختی ٦٩/٦ درصد (نسبت به آلومینیم خالص) افزایش یافت. در مقدار بیشتر از درصد بهینه (۳/۵ و ٤/۵ درصد گرافیت)، عکس این روند رخ داد.

۳- با افزایش درصد گرافیت بیش از درصد بهینه، بزرگترشدن توده‌های کروی گرافیتی مشاهده می‌شود که به عنوان محل‌های تمرکز تنش و باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شوند.

٤- در مقایسه با روش‌های دیگر، در این روش حذف عیوب ریخته‌گری از جمله جدایش اتفاق می‌افتد و نسبت به روش آسیاکاری نیز افزایش یکنواختی در توزیع گرافیت در زمینه مشاهده می‌شود که باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود.

٥- با افزایش فشار تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای (از ١٤ به ٢٨ مگاپاسکال)، میزان سختی ٦١/٧ درصد افزایش پیدا کرد.

٦- با افزایش زمان تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای (از ۳۹۰ ثانیه به ٦۰۰ ثانیه)، میزان تف‌جوشی نمونه، استحکام فشاری (تا ۱۱/۵ درصد) افزایش یافت. ولی تأثیر زمان تف‌جوشی کردن روی استحکام فشاری کمتر از تأثیر فشار است.

۷- نتایج نشان داد که روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای برای تف‌جوشی، بیشترین بازدهی را نسبت به روش پرس سرد-تف‌جوشی دارد.

۸- با افزایش درصد گرافیت (۰ و ۱/۵ و ۲/۵) تا مقدار بهینه (۳ درصد)، میزان استحکام فشاری تا ۱۳۸/۷ درصد افزایش یافت. برای حالت مقدار بیشتر از درصد بهینه، عکس این روند رخ داد.

مراجع

1. Lin J. F., Shih M.G., Chen Y.W., "The tribological performance of 6061 aluminium materials in oil lubricants with EP additives", *Wear*, Vol. 198, pp. 58-70, (1996).

2. Rohatgi P.K., Liu Y., Yin M., Barr T., "A surface-analytical study of tribo-deformed aluminum alloy319-%10Vol graphite particle composite", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 123, pp. 213-218, (1990).

3. Basavara Jappa S., Chandramohan G., Davim J., "Application of Taguchi techniques to study dry sliding wear behavior of metal matrix composites", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1393-1398, (2006).

4. Das S., Parasad S.V., Ramachandran T.R., "Tribology of Al-Si alloy - graphite composites: triboinduced graphite films and the role of silicon morphology", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 138, pp. 123-132, (1991).

5. Rohatgi P.K., Liu Y., Barr T., "Tribological behavior and surface analysis of tribo-deformed Al alloy-50 pct graphite particle composites", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol 22, pp. 1435-1441, (1991).

6. Yang J.B., Lin C.B., Wang T.C., Chu H.Y., "The tribological characteristics of A356.2 Al alloy/Gr(p) composites", *Wear*, Vol. 257, pp. 941-952, (2004).

7. Ibrahim I.A., Mohamed F.A., Lavernia E.J., "Particulate reinforced metal matrix composites-a review", *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 1137-1156, (1991).

8. Liu H., Rohatgi P.K., "Tribological characteristics of aluminum-50 vol pct graphite composite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 22, pp. 151-159, (1993).

9. Pillai U.T.S., Pal B.C., Satyanarayana K.G., Damodaran A.D., "Fracture behaviour of pressure die-cast aluminium-graphite composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 30, pp. 1455-1461, (1995).

10. Parasad K., Das S., "The significance of the matrix microstructure on the solid lubrication characteristics of graphite in aluminium alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 144, pp. 229-235, (1991).

11. Wei J.N., Cheng H.F., Zhang Y.F., Han F.S., Zhou Z.C., Shui J.P., "Effects of macroscopic graphite particulates on the damping behavior of commercially pure aluminum", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 325, pp. 444-453, (2002).

12. Jha A.K., Prasad S.V., Upadhayaya G.S., "Preparation and properties of 6061 aluminium alloy/graphite composites by PM route", *Powder Metallurgy*, Vol. 32, pp. 309-313, (1989).

13. Biswas S., Srinivasa U., Seshan S., Rohatgi P.K., "Cast aluminum-graphite composites for industrial applications", *AFS Transactions*, Vol. 88, pp. 159-166, (1980).

14. Torralba J.M., Costa A.E., Velasco F., "PM aluminum matrix composites: an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 133, pp. 203-206, (2003).

15. Latief F.H., Sherif El-Sayed M., "Effects of sintering temperature and graphite addition on the

mechanical properties of aluminum", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 2129–2134, (2012).

16. Flores-Zamora M.I., Estrada-Guel I., Gonzalez-Hernandez J., Miki-Yoshida M., Martınez-Sanchez R., "Aluminum–graphite composite produced by mechanical milling and hot extrusion", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 434-435, pp. 518–521, (2007).
17. Guo M.L., Tsao C.Y.A., "Tribological behavior of self-lubricating Aluminum/SiC/Graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder densification method", *Composite Science and Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 65-74, (2000).
18. Chu H., Liu K., Yeh J., "An insitu composite of A1 (graphite, Al_4C_3) produced by reciprocating extrusion", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 277, pp. 25-32, (2000).
19. Estrada-Guel I., Carreno-Gallardo C., Mendoza-Ruiz D.C., Miki-Yoshida M., Rocha-Rangel E., Martinez-Sanchez R., "Graphite nanoparticle dispersion in 7075 aluminum alloy by means of mechanical alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483, No. 1-2, pp. 173–177, (2009).
20. Lin C.B., Chang R.J., Wang W.P., "A study on process and tribological behavior of Al alloy /Gr(p) composite", *Wear*, Vol. 217, pp. 167-174, (1998).
21. Gupta M., Lim S.C., Ng W.B., "Processing, microstructure, and mechanical properties of (A1-Cu)/Cu composites synthesized using partial liquid phase casting process", *Materials Science and Technology*, Vol. 13, pp. 584-589, (1997).

۲۲. تفریشی ر.، باباخانی ا.، "بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم گرافیت تولید شده به روش متالورژی پودر"، سومین همایش مشترک مهندسان متالورژی ایران، (۱۳۸۸).

23. Daneshvar Sh., Khoramshahi F., Khademi D., Yavari Mehrabani H., Babakhani A., "Fabrication of Aluminum–Graphite Composites by SPS Method", The 3rd International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-3)", Tehran, Iran, (2012).
24. Kuzumaki T., Miyazawa K., Ichinose H., Ito K.J., "Processing of carbon nanotubes aluminium composite", *Materials Research*, Vol. 13, No. 9, pp. 2445–2449, (1998).